

## 볼 압입시험을 이용한 주조 스테인리스강의 인장물성치 평가

### Evaluation of Tensile Properties of Cast Stainless Steel using Ball Indentation Test

김진원 · 김지연  
조선대학교 원자력공학과

#### 요 약

본 연구에서는 주조 스테인리스강의 열화 평가에 대한 볼 압입시험의 적용성을 살펴보기 위해서, 미세조직과 강도가 다른 4종류의 주조 스테인리스강과 316 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험을 수행하고 결과의 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 각 재료 별로 볼 압입시험 데이터의 분산과 볼 압입시험에서 측정된 인장물성치를 인장시험 결과와 비교하였다. 분석 결과, 한 시편에서 측정된 데이터중 경향에서 크게 벗어나는 2point의 데이터를 제거한 경우, 모든 주조 스테인리스강에서 데이터의 분산은 최대 물성치평균의 6% 정도를 보였으며, 평균 물성치평균의 1.5~2.5% 정도를 보였다. 또한, 이들 데이터의 분산은 주조 스테인리스강의  $\delta$ -페라이트 함량이 높을수록 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 한편, 볼 압입시험을 통해 취득된 인장물성치는 주조 스테인리스강의 종류에 관계없이  $\pm 10\%$  범위 내에서 인장시험 결과를 예측하였다.

#### Abstract

In this study the ball indentation tests were performed on the four unaged cast stainless steel and 316 stainless steel, which have different microstructure and strength, to examine the applicability of ball indentation test to the evaluation of thermal aging of cast stainless steel. Also, the reliability of test results were analyzed by evaluating the scattering of data tested from each material and by comparing tensile properties obtained from ball indentation test and tensile test. The results showed that the maximum standard deviation to mean value are less than 6%, and the average standard deviation to mean value are about 1.5~2.5%, when 2 point data that show out of trend were discarded from the data set tested a single specimen. Also, the scattering increased slightly with decreasing  $\delta$ -ferrite content. Additionally, the ball indentation test predicted the tensile properties of cast stainless steel within an error of  $\pm 10\%$  for all materials.

## 1. 서론

원자력발전소에서 주요 기기의 재질 열화는 이들 기기의 건전성을 저하시키는 주요 원인으로 원전의 안전성에 직접적인 영향을 미친다. 원전 주요 기기에서 발생하는 재료의 열화 현상은 재료의 종류와 기기의 사용 환경에 따라 여러 가지 형태로 나타나는데, 이들 재질 열화 현상중 하나가 주조 스테인리스강의 열취화 현상이다. 원자력발전소에서 주조 스테인리스강은 주로 주냉각재 배관, 펌프 및 밸브 등에 사용되며, 오스테나이트 스테인리스강의 용접부에서도 주조 스테인리스강과 동일한 성질의 재료가 생성된다. 주조 스테인리스강의 열취화 현상은 원전 가동 온도에서 기기가 장시간 노출됨에 따라 나타나는 온도에 의한 열화 현상으로 강도의 증가와 파괴인성의 감소와 같이 재료의 기계적인 물성치 변화를 야기하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서, 원전의 수명관리나 주기적 안전성 평가와 같이 가동 중인 원전의 기기에 대한 건전성을 평가하기 위해서는 주조 스테인리스강의 열취화 평가가 반드시 고려되어야 할 항목으로 인식되고 있다[2]. 그러나, 가동 중 원전 기기의 경우에 기존의 파괴적 방법으로는 재료 물성치를 직접 평가하는 것이 거의 불가능하므로, 대부분의 경우에는 동일 등급 재료의 모의 열화 데이터를 이용하여 간접적으로 평가하는 방법이 적용되고 있다[3]. 그러나, 이러한 간접적 평가 방법은 가동 중 기기의 건전성 평가 결과에 대한 불확실성을 증가시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 가동 중인 원전 기기로부터 직접 열화 정도를 평가할 수 있는 준 비파괴적인 방법의 개발이 필요하다.

그 동안 주조 스테인리스강의 열화를 평가하기 위해 전기화학적 방법, Small 펀치 시험법 등과 같은 다양한 형태의 준비파괴적인 평가 방법들이 연구되었다. 그러나 주조 스테인리스강의 재질적인 불균일성과 실험상의 불확실성 등으로 인해 아직까지 이들 방법들이 실제 적용되지는 못하고 있는 실정이다. 따라서, 여기서는 최근 준비파괴적인 방법으로 재료의 인장물성치를 측정할 수 있는 것으로 알려진 연속 볼 압입시험을 이용하여 주조 스테인리스강의 열화 평가를 시도하고자 한다. 연속 볼 압입시험은 1mm 이하의 작은 볼을 재료 표면에 압입하여 인장물성치를 측정하는 준비파괴적인 시험방법으로 1990년대 이후부터 국내·외적으로 활발한 연구가 진행되었으며[4~7], 이들 연구 결과에 의하면 원자로압력용기의 조사취화, 용접부와 같은 국소부의 재료물성치 변화, 그리고 가스 배관 등에 대한 열화 평가에 적절한 것으로 보고 되고 있다. 또한, 최근에는 연속 볼 압입시험 데이터를 이용하여 재료의 파괴인성을 평가하기 위한 노력이 이어지고 있다[8,9].

따라서, 본 연구에서는 이상조직을 갖는 주조 스테인리스강의 열화 평가에 볼 압입시험의 적용 타당성을 살펴보기 위해서, 먼저 열화되지 않은 주조 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험을 수행하고 데이터의 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 미세조직과 강도가 다른 4 종류의 주조 스테인리스강을 이용하여 연속 볼 압입시험을 수행하였으며, 데이터의 신뢰성을 분석하기 위해서 각 시험 재료별 데이터의 분산과 인장시험 데이터와의 편차 등을 비교하였다.

## 2. 시험 재료 및 절차

### 2.1 시험 재료

볼 압입시험에는 강도와 미세조직, 특히  $\delta$ -페라이트 함량이 다른 4종류의 주조 스테인리스강이 고려되었다. 본 연구에서 고려된 주조 스테인리스강의  $\delta$ -페라이트 함량과 재료의 종류는 현재 운전 중인 국내 원전의 주냉각재 배관의 화학조성을 기초로 결정되었으며,  $\delta$ -페라이트 함량이 낮은 L-등급, 중간인 M-등급, 높은 H-등급의 CF8M 3종류와 CF8A 1종류

가 선택되었다. 한편, 미세조직에 대한 영향을 보다 체계적으로 분석하기 위해서 미세조직이 균일하면서 기계적물성치는 주조 스테인리스강과 유사한 316 스테인리스강에 대한 실험을 함께 수행하였다.

### 재료의 제작

본 연구에서 사용된 4종류의 주조 스테인리스강은 모두 실험용으로 주조된 것이며, CF8M\_M과 CF8A는 각각 30kg의 4각 주괴 형태로, CF8M\_H와 CF8M\_L은 80mm×150mm×340mm의 블록 형태로 제작되었다. 모든 재료는 주조 후 1100°C 에서 용체화 처리하여 급냉시킴으로써 재질 내의 탄화물 및  $\sigma$ -상을 감소시켰다. 각 재료에 대한 주조시 화학조성은 Table 1과 같으며, Aubery의 이론식[10]에 따라 계산된 페라이트 함량을 고려하여 화학조성이 결정되었다.

### 미세조직

볼 압입시험에 앞서 실험에 사용될 주조 스테인리스강의 미세조직적인 차이를 정량화하기 위해서 페라이트 측정기를 이용하여 시편으로 가공된 재료의  $\delta$ -페라이트 함량을 측정하고, 광학현미경 사진을 이용하여 각 재료의  $\delta$ -페라이트 분포를 확인하였다. Table 2는 각 시편에서 측정된  $\delta$ -페라이트 함량의 평균과 시편별 표준편차를 나타낸 것이다. Table에서 알 수 있는 것과 같이 시편 별로 페라이트 함량의 편차는 있으나 전체적으로 1.5% 내외의 표준편차를 보였으며, 각 재료 종류별  $\delta$ -페라이트의 평균 함량은 CF8M\_L이 10.1%, CF8M\_M이 20.6%, CF8M\_H가 26.0%, 그리고 CF8A가 25.9%를 보였다. Fig. 1은 각 재료의 미세조직을 관찰한 것으로 각 재료별로 페라이트 크기, 간격, 그리고 배열이 다르게 형성되어 있는 것을 알 수 있다.  $\delta$ -페라이트 함량이 10% 정도인 CF8M\_L의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트(검은색)가 여러 곳에 분산(100 $\mu$ m이상 떨어짐)되어 존재한다. 반면,  $\delta$ -페라이트의 함량이 20% 정도인 CF8M\_M의 경우에는 오스테나이트 조직 내에 작은 페라이트가 조밀(15~20  $\mu$ m정도의 간격)하게 배열되어 있다.  $\delta$ -페라이트의 함량이 26% 정도인 CF8M\_H의 경우에는 CF8M\_M에 비해  $\delta$ -페라이트가 조대하고, 페라이트 사이의 간격이 넓으며(50  $\mu$ m정도의 간격), 오스테나이트 기지내에  $\delta$ -페라이트들이 연속적으로 연결되어 배열하는 것을 알 수 있다. 또한,  $\delta$ -페라이트의 함량이 26% 정도인 CF8A의 경우에는 CF8M\_H에 비해  $\delta$ -페라이트의 크기는 작으나, CF8M\_M에 비해  $\delta$ -페라이트간의 간격이 넓고 페라이트의 크기가 크며 서로 연결되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, CF8M\_M와 CF8A에서  $\delta$ -페라이트의 함량이 예상보다 약간 높은 것을 제외하면, 본래 의도된 것과 같이 미세조직이 다른 주조 스테인리스강이 시험에 적용된 것을 알 수 있다.

### 인장특성

한편, 시험에 사용될 재료에 대한 인장물성치를 표준인장시험을 통해 측정하였다. 인장시험은 볼 압입시험이 완료된 시편을 이용하여 측정되었으며, 각 재료당 3개의 시편이 이용되었다. Table 3은 CF8M과 CF8A에 대한 ASME Sec.II의 최소요구 강도와 측정된 주조 스테인리스강의 인장물성치를 비교하여 나타낸 것이다. Table 3에 나타나 있는 것과 같이 실험에 사용된 주조 스테인리스강의 강도는 ASME Sec.II의 최소요구 강도를 모두 만족하고 있으며, CF8M의 경우 재료의  $\delta$ -페라이트 함량에 따라 항복강도가 증가하여 CF8M\_L이 가장 낮고, CF8M\_H가 가장 높은 값을 보였다. 인장강도의 경우에는 항복응력과 달리  $\delta$ -페라이트의 함량이 가장 높은 CF8M\_H가 CF8M\_M보다 30MPa 정도 낮은 값을 보였으며,

CF8M\_H와 유사한  $\delta$ -페라이트 함량을 가진 CF8A가 CF8M\_M보다 낮은 강도를 보였다.

## 2.2 시편 및 실험 절차

### 시편

본 연구에서는 볼 압입시험에 대한 결과의 신뢰성을 분석하는 것이 중요한 목적이므로 볼 압입시험을 통해 데이터를 측정하고 동일한 시편을 이용하여 인장시험을 수행할 수 있도록 Fig. 2에서 보는 것과 같이 모든 볼 압입시편을 4각 봉상(10mm×10mm×80mm or ×90mm)으로 제작하였다. 볼 압입시험은 작은 볼을 압입하면서 하중과 압입 깊이를 측정하므로 시험 결과가 시편의 가공 상태에 상당히 민감하다. 따라서, 볼 압입시편은 모든 면을 연삭하여 하중이 작용되는 동안에 시편의 늘림이나 기울어짐이 없도록 하였으며, 시험면은 #1200까지 연마하여 표면 거칠기에 의한 영향을 제거하였다. 또한, 실험 결과의 신뢰도를 높이기 위해서 각 시편 당 5~7 point에서 데이터를 측정하였다.

### 시험절차

본 연구에서 사용된 볼 압입시험 장비는 Frontics사의 AIS-2000 모델(Fig. 3)로 인장물성치의 측정은 식(1)과 (2)에 나타낸 것과 같이 볼 압입에 따른 하중과 압입 흔적의 크기로부터 응력과 변형률이 계산된다. 1 point의 볼 압입 과정에서 보통 15~25회 정도의 가중(加重)과 해중(解重)이 반복되며, 각 cycle마다 하중과 탄성 회복량을 측정하여 응력과 변형률을 계산하고, 이 데이터를 식(3)으로 curve fitting하여 응력-변형률 곡선을 구한다. 또한, 응력-변형률 곡선으로부터 응력계수 K, 가공경화지수 n, 그리고 항복응력과 인장강도를 계산하며, 모든 계산은 시험장치와 연결된 프로그램에서 자동으로 수행된다.

$$\sigma = \frac{1}{\psi} \frac{F}{\pi a^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{a}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2)$$

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3)$$

여기서, a는 압흔의 반경으로 압입 후 볼의 해중 과정에서 미세하게 발생하는 볼 하부의 탄성 회복량으로부터 계산되며, F는 볼 압입하중, R은 압입자의 반경,  $\psi$ 는 상수,  $\epsilon$ 는 소성 구속인자이다.

가중과 해중 과정에서 발생할 수 있는 시편의 흔들림을 최소화하기 위해서 가능한 시편의 중심에서 압입이 이루어지도록 실험을 수행하였으며, 한 시편에서 5~7 point의 데이터가 측정되는 동안 재질 상의 변화 이외의 영향인자를 최소화하기 위해서 측정 point가 시편의 길이방향으로 일정한 간격을 가지고 나란히 정렬될 수 있도록 시편을 이동시키며 실험을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 재료에 따른 볼 압입시험 데이터의 분산 비교

4종류의 주조 스테인리스강과 316 스테인리스강을 대상으로 볼 압입시험을 수행하고, 각 시편 별로 5~7point에서 측정된 최대 볼 압입하중, 항복응력, 인장강도, 응력계수, 그리고 가공경화지수의 평균과 표준편차를 계산하였다. 재료에 따른 데이터의 분산 정도를 보다 정

량적으로 살펴보기 위해서 각 시편에서 측정된 재료물성치 데이터의 표준편차를 평균으로 무차원화한 값을 재료의  $\delta$ -페라이트 함량에 따라 나타내었다. 이때 각 시편에서 측정된 모든 데이터를 적용한 경우와 데이터 중 경향에서 벗어나는 2point의 데이터를 제거한 경우의 분산을 각각 분석하였다.

Fig. 4(a)는 각 시편에서 측정된 5~7point의 데이터를 모두 이용하여 계산한 데이터의 분산을 나타낸 것으로 각 시편별 평균 값에 대한 분산의 비가 항복응력의 경우에는 최대 10%, 인장강도의 경우에는 최대 5%, 그리고 응력계수와 가공경화지수는 최대 12% 정도로 나타났으며, 316 스테인리스강을 제외하면 재료의 종류에 관계없이 분산의 범위는 모두 비슷한 것을 알 수 있다. 최대 불 압입하중의 경우는 주조 스테인리스강의  $\delta$ -페라이트 함량이 가장 낮은 CF8M\_L에서 데이터의 분산이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 한편, 각 시편에서 측정된 데이터 중 경향에서 가장 크게 벗어나는 2 point의 데이터를 제거한 후 데이터의 분산을 평가한 경우에는, Fig. 4(b)에서 알 수 있는 것과 같이 최대하중을 제외한 모든 인장물성치에서 분산의 범위가 모든 데이터를 이용한 경우에 비해 2배 이상 감소하였다. 이 경우에도 316 스테인리스강을 제외하면 분산의 최대 범위는 재료의 종류에 관계없이 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 이들 분산 값들에 대한 재료별 평균을 살펴보면 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 모든 재료에서 항복응력, 인장강도, 최대 압입하중의 분산이 평균 값의 2.5% 이하이며, CF8M 재료의 경우에 CF8M\_L에서 분산이 가장 크고, CF8M\_M, 그리고 CF8M\_H에서 가장 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 동일한 재료 내에서  $\delta$ -페라이트 함량이 증가됨에 따라 데이터의 분산이 평균적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서  $\delta$ -페라이트의 함량이 낮을수록 분산이 증가되는 이러한 거동은 Fig. 1에서 관찰된 바와 같이 재료의 미세조직과 연관되는 것으로 판단된다. 즉,  $\delta$ -페라이트의 함량이 낮은 경우에는 오스테나이트 기지 속에 페라이트들이 독립적으로 분산되어 있기 때문에 불이 압입되는 위치에 따라 불 하부에서의 응력과 변형이 불균일하게 발생하는 반면,  $\delta$ -페라이트의 함량이 높은 경우에는 페라이트 사이의 간격이 감소하며 서로 연결되어 있기 때문에 불 압입에 따른 불 하부에서의 응력과 변형의 분산이 비교적 균일하게 발생할 수 있기 때문인 것으로 설명된다.

### 3.2 불 압입시험과 인장시험 결과의 비교

Fig. 6은 불 압입시험 결과를 인장시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선과 비교한 것이다. 전체적으로 소성변형 영역에서 곡선이 차이를 보이는데, 인장시험 결과에서는 소성변형 영역의 응력-변형률 곡선이 거의 직선에 가까운 반면 불 압입 결과에서는 곡선으로 나타났다. 따라서, 재료별로 약간씩 다르지만, 3~20% 정도의 변형률에서는 불 압입시험 결과가 인장시험 데이터에 비해 높은 응력 값을 보이며, 그 밖의 변형률 구간에서는 인장시험 결과가 높은 응력 값을 보였다. 불 압입시험과 인장시험 결과의 이러한 차이는 불 압입시험 결과가 스테인리스강의 가공경화 거동을 잘 나타내지 못하기 때문이다. 즉, 불 압입시험에서 재료의 가공경화 거동이 식(3)의 power law를 따르는 것으로 가정하고 있으나, 스테인리스강의 경우에는 가공경화 거동이 power law를 잘 따르지 않기 때문이다. 따라서, 인장시험 결과를 식(3)으로 curve fitting 후 응력-변형률 곡선을 비교하였다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 316 스테인리스강은 여전히 큰 차이를 보였다. 주조 스테인리스강에서는 4종류의 재료 모두에서 불 압입시험의 결과가 인장시험 결과보다 높은 응력 값을 보였지만, 전체적으로 응력-변형률 거동은 비교적 일치하는 것을 알 수 있다.

한편, 주조 스테인리스강에 대한 불 압입시험 결과와 인장시험 결과의 정량적 비교를 위

해서 각 시험에서 구한 인장물성치를 각각 비교하였다. 물성치의 비교는 볼 압입시험 후 인장시험이 완료된 시편의 경우에는 각 시편별로 데이터를 비교하였으며, 볼 압입시험 후 인장시험이 수행되지 않은 시편의 경우에는 동일 재료 인장시험 결과의 평균과 볼 압입시험 결과를 비교하였다. Fig. 7은 볼 압입시험에서 구한 항복응력, 인장강도, 강도계수, 그리고 가공경화지수를 인장시험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig.7(a)에서 알 수 있는 것과 같이 항복응력은 316 스테인리스강을 제외하면 모든 재료에서 볼 압입시험이 인장시험 결과를 약 10% 정도 과대평가하는 결과를 주었으며, CF8M\_H에서 가장 정확한 결과를 보였다. 또한, 인장강도의 경우에는 데이터의 분산은 크지만 CF8M\_L과 CF8M\_H에서는 거의 정확한 예측을 보였으며, CF8M\_M과 CF8A의 경우에는 볼 압입시험 결과가 인장시험 결과를 약 7%와 4% 정도 각각 과소평가하는 경향을 보였다. 그러나, 316 스테인리스강의 경우에는 인장시험 결과를 17% 이상 크게 과소평가하는 결과를 보였다. 한편, 강도계수와 가공경화지수의 경우에는 항복응력과 인장강도에 비해 전체적으로 오차가 크게 관찰되었으나, 모든 재료에서 평균적으로 10% 이내의 평균 오차를 보였다.

따라서, 이들 결과로부터 10~25% 정도의  $\frac{1}{2}$ -페라이트의 함량을 갖는 주조 스테인리스강의 경우에 미세조직과 강도에 관계없이 볼 압입시험이 인장물성치를 평균 10% 이내의 오차 범위에서 측정 가능한 것을 알 수 있다. 다만, 316 스테인리스강과 CF8M\_M과 CF8A의 비교 결과에서 알 수 있는 것과 같이 재료의 가공경화가 크게 발생하여 항복강도와 인장강도의 차이가 크게 나타나는 재료에서는 상대적으로 오차가 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 이러한 재료에서는 인장강도를 과소평가하는 경향을 보였다. 이것은 볼 압입시험을 통한 재료의 물성치 평가에서 power law 응력-변형률 거동을 가정하고 있기 때문으로 판단된다.

#### 4. 종합정리

본 연구에서는 볼 압입시험을 통한 주조 스테인리스강 열화 평가의 타당성을 살펴보기 위해서, 열화되지 않은 주조 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험의 신뢰성을 평가하였다. 이를 위해서 미세조직과 강도가 다른 4종류의 주조 스테인리스강과 316 스테인리스강을 이용하여 볼 압입시험을 수행하고, 각 재료별 데이터의 분산과 인장시험 데이터와의 오차를 비교하였다. 비교 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 각 시편에서 측정된 데이터 중 경향에서 벗어나는 2point의 데이터를 제거한 경우의 분산이 전체 데이터 이용한 경우의 분산보다 2배 이상 감소되었으며, 이 경우에 모든 주조 스테인리스강에서 항복응력, 인장강도, 최대 압입하중 데이터의 분산은 최대 평균의 6% 정도를 보였으며, 평균 분산은 1.5~2.5% 정도를 보였다. 또한, 이들 데이터의 분산은 주조 스테인리스강의  $\frac{1}{2}$ -페라이트 함량이 높을수록 약간씩 감소하는 경향을 보였다.

2) 재료에 따라 차이는 있으나, 주조 스테인리스강의 경우에 볼 압입시험이 평균 10% 이내의 오차 범위에서 인장물성치를 예측하였으며, 재료의 가공경화가 크게 발생하여 항복응력과 인장강도의 차이가 크게 발생하는 재료에서 오차가 증가하는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 원자력연구기반확충사업의 기초 분야 연구로 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Shah, V.N. and Macdonald, P.E., 1993, "Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components." Elsevier Science Pub.
- [2] EPRI, 1998, "Generic Licence Renewal Technical Issues Summary," EPRI TR-107521
- [3] Chopra, O.K., and Shack, W.J., 1994, "Assessment of Thermal Embrittlement of Cast Stainless Steel," NUREG/CR-6177, ANL-94/2.
- [4] Haggag, F.M., et al., 1990, "Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials," ASTM STP 1092, pp.188-208.
- [5] 이윤희 외, 2001, "Advanced indentation 기법을 이용한 압력용기 소재 응력-변형 거동의 온도 의존성 분석," 제8회 원전 기기건진성 Workshop 논문집, pp.335-348.
- [6] Lee, H. and Lee, J.H, 2001, "An indentation theory based on FEA solutions for property evaluation," Trans. of KSME (A), Vol.25, No.11, pp.1685-1696.
- [7] Murty, K.L., et al., 1999, "Characterization of gradients in mechanical properties of SA-533B steel welds using ball indentation," Int. J. of Pres. Vess. & piping, Vol.76, pp.361-369.
- [8] Byun, T.S., et al., 1998, "A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test," J. of Nucl. Materials, 252, pp. 187-194.
- [9] 김형익 외, 2003, "Evaluation of the Ductile-Brittle Transition Behavior of Degraded Material using Ball Indentation Method," 2003년도 재료 및 파괴부분 추계학술대회 논문집, pp.186-191.
- [10] Aubery, L.S., et al, 1982, "Ferrite measurement and control in cast duplex stainless steel," in SS Casting, ASTM STP 756, pp.126-164

Table 1 실험에 사용된 주조 스테인리스강의 화학조성(w/o)

Material		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Co	Fe
CF8M	L	0.04	0.6	0.8	19.5	11.0	2.5	-	-	-	Balance
	M	0.04	0.6	1.0	19.2	9.6	2.25	0.02	0.03	0.1	Balance
	H	0.04	0.6	1.2	20.0	9.0	2.5	0.02	0.03	0.04	Balance
CF8A		0.04	0.6	1.2	20.5	8.5	-	0.02	0.03	0.1	Balance

Table 2 δ-페라이트 함량 비교

Material		δ-페라이트의 함량 (%)	
		평균	표준편차
CF8M	L	10.11875	1.01830
	M	20.6	1.19087
	H	26.02813	1.05593
CF8A		25.90833	1.54299

Table 3 실험에 사용된 주조 스테인리스강의 인장 물성치 비교 (상온)

Material		ASME Sec.II		시험재료	
		항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)
CF8M	L	205	485	253.1	511.3
	M			300.6	623.4
	H			318.7	595.4
CF8A		240	530	285.4	605.8

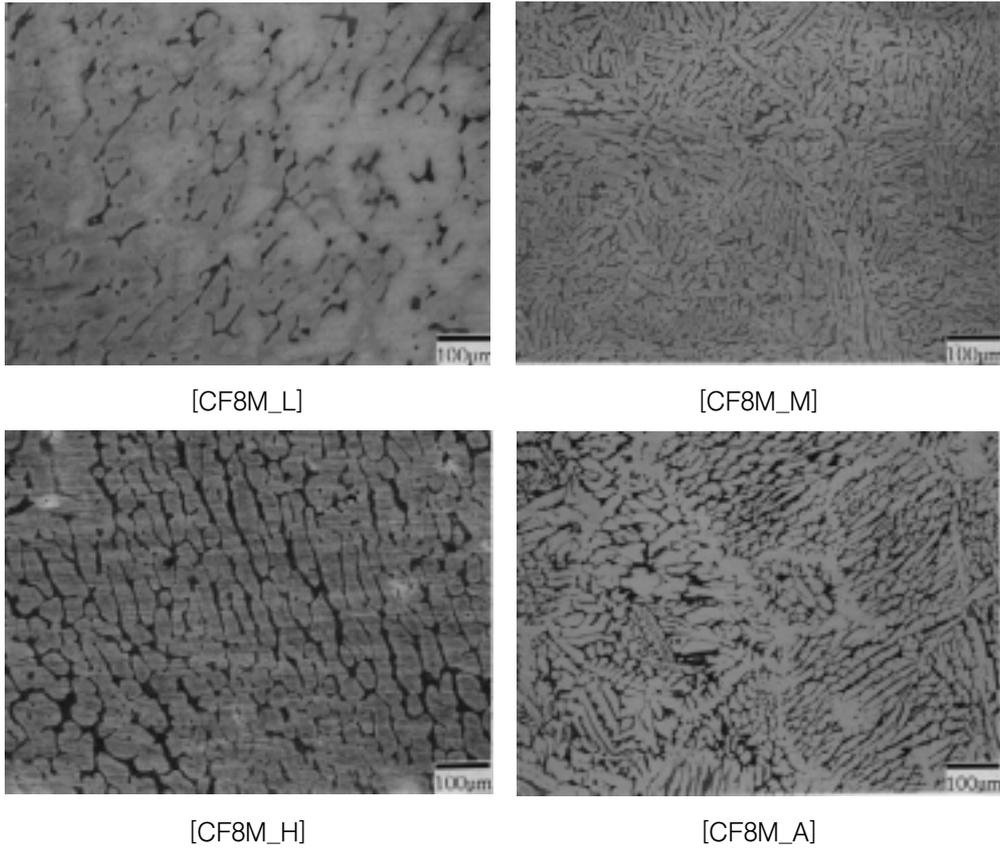


Fig. 1 주조 스테인리스강의 미세조직 사진



그림 2 볼 압입시험편

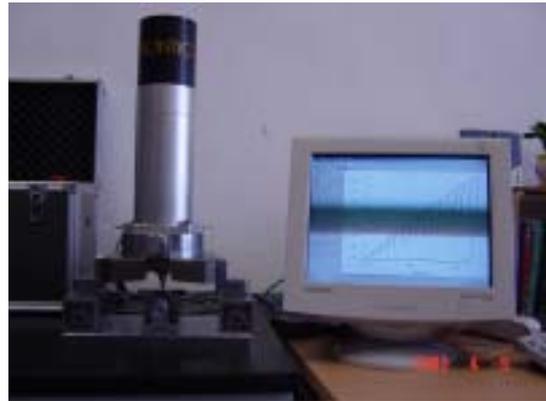


Fig. 3 볼 압입시험 장비

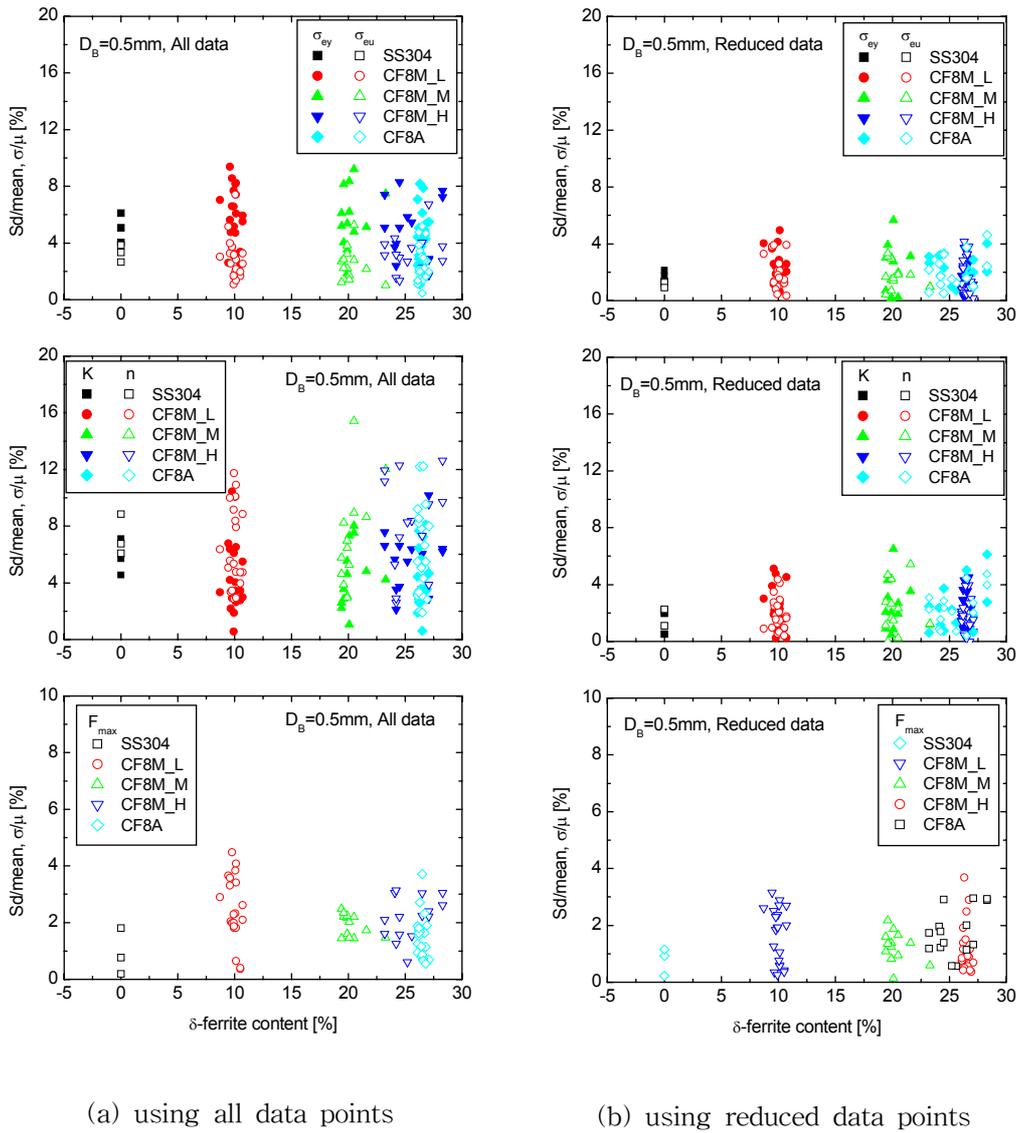


Fig. 4 재료에 따른 각 시편의 데이터 분산 비교

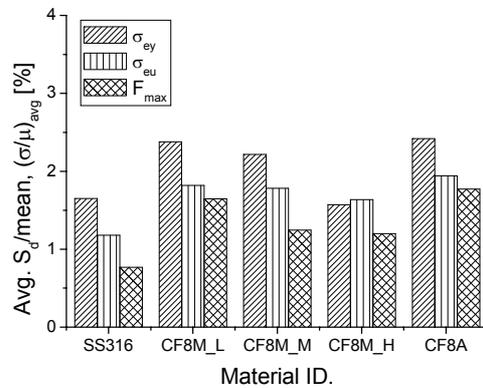


Fig. 5 재료에 따른 평균 분산 비교

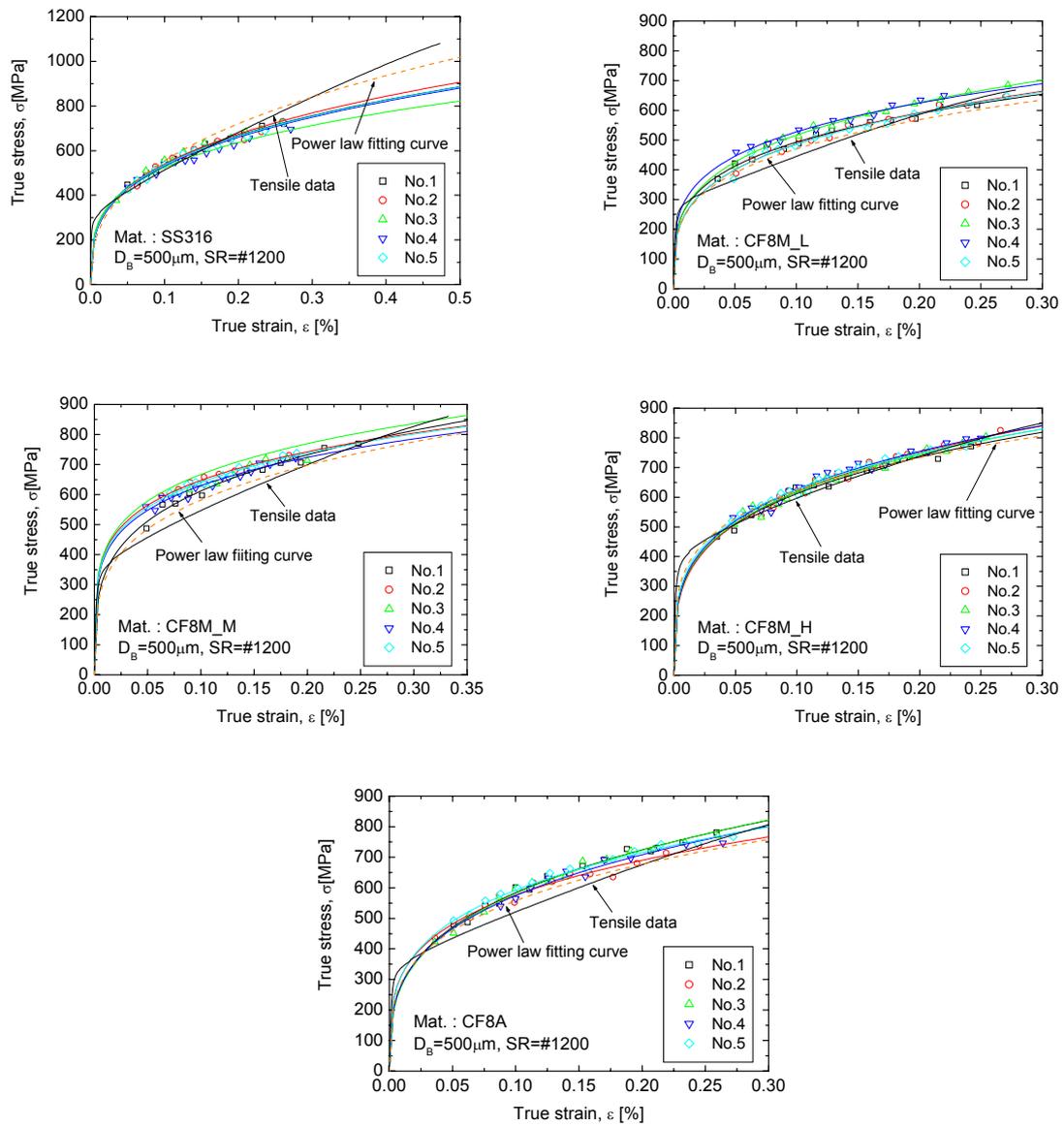
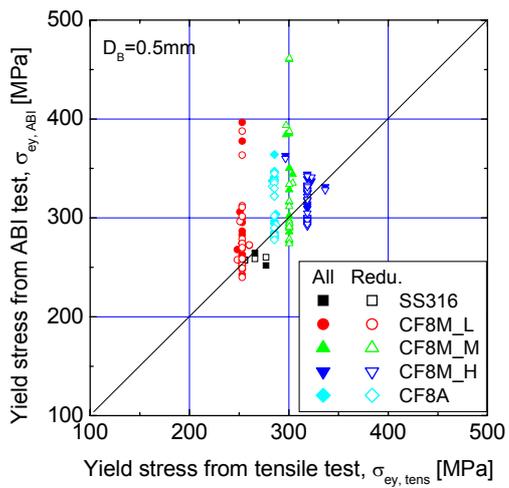
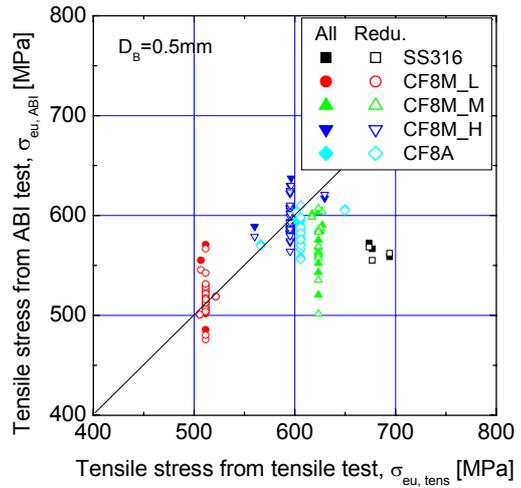


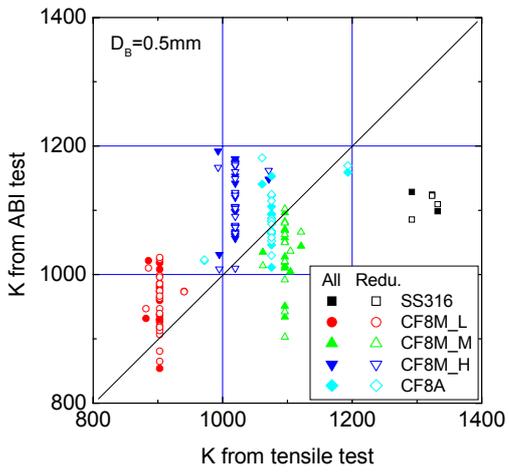
Fig. 6 인장시험 결과와 볼 압입시험 응력-변형률 곡선의 비교



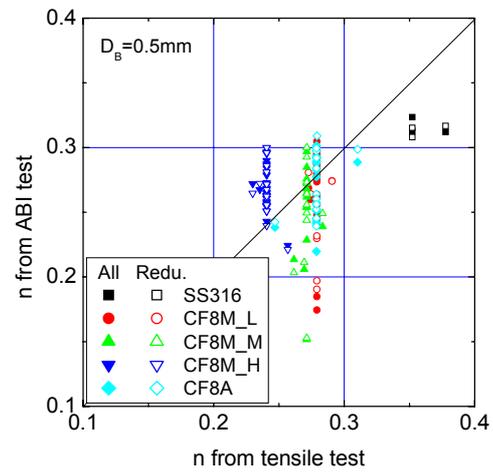
(a) yield stress



(b) tensile stress



(c) strength coefficient



(d) hardening exponent

Fig. 7 볼 압입시험 결과와 인장시험 결과의 인장물성치 비교